

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平11-72640

(43) 公開日 平成11年(1999) 3月16日

(51) Int.Cl.⁴

識別記号

F I

G 0 2 B 6/16
6/22G 0 2 B 6/16
6/22

審査請求 有 請求項の数11 O L (全 17 頁)

(21) 出願番号 特願平10-29782
(22) 出願日 平成10年(1998) 2月12日
(31) 優先権主張番号 特願平9-27975
(32) 優先日 平9(1997) 2月12日
(33) 優先権主張国 日本 (J P)
(31) 優先権主張番号 特願平9-179896
(32) 優先日 平9(1997) 7月4日
(33) 優先権主張国 日本 (J P)

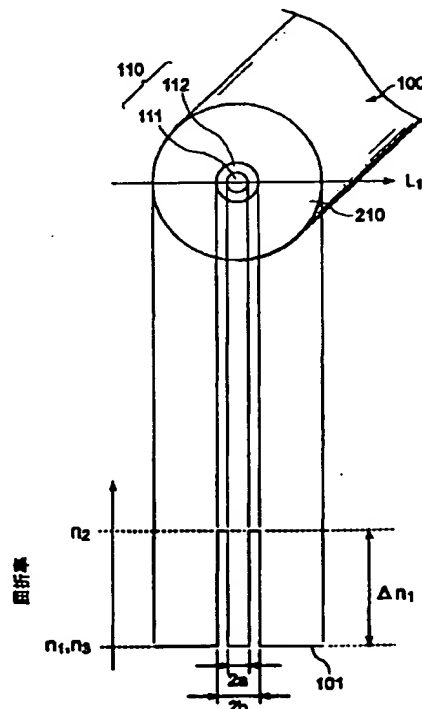
(71) 出願人 000002130
住友電気工業株式会社
大阪府大阪市中央区北浜四丁目5番33号
(72) 発明者 加藤 考利
神奈川県横浜市栄区田谷町1番地 住友電
気工業株式会社横浜製作所内
(72) 発明者 奥野 俊明
神奈川県横浜市栄区田谷町1番地 住友電
気工業株式会社横浜製作所内
(72) 発明者 笹岡 英資
神奈川県横浜市栄区田谷町1番地 住友電
気工業株式会社横浜製作所内
(74) 代理人 弁理士 長谷川 芳樹 (外3名)

(54) 【発明の名称】 分散シフトファイバ

(57) 【要約】

【課題】 MFDの値を小さく維持したまま非線形光学現象の発現を効果的に抑制する構造を備えた、長距離海底ケーブル等に好適なWDM伝送用の分散シフトファイバを提供する。

【解決手段】 この発明の分散シフトファイバでは、波長1550nmにおける諸特性として、絶対値が1.0～4.5ps/nm/kmの分散と、70 μm^2 以上の実効コア断面積と、2mのファイバ長において1300nm以上のカットオフ波長と、そして、0.05～0.09ps/nm²/kmの分散スロープとを有するとともに、信号光の基底モードの光パワー分布が最大となる位置が、コア領域中心から径方向に所定距離だけ離間するよう設計されている。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 所定の基準軸に沿って伸びたコア領域と該コア領域の外周に設けられたクラッド領域とを備えた、1.55 μ m波長帯の信号光を伝搬するための分散シフトファイバであって、該1.55 μ m波長帯の中心波長における諸特性として、

その絶対値が1.0 \sim 4.5ps/nm/kmである分散と；0.05 \sim 0.09ps/nm²/kmの分散スロープと；70 μ m²以上の実効コア断面積と2mのファイバ長において、1300nm以上のカットオフ波長と、を有する分散シフトファイバ。

【請求項2】 前記コア領域は、第1の屈折率を有する内側コアと、該内側コアの外周に設けられ、該第1の屈折率よりも高い第2の屈折率を有する外側コアとを備えるとともに、前記クラッド領域は、前記外側コアの外周に設けられるとともに、前記第2の屈折率よりも低い屈折率を有することを特徴とする請求項1記載の分散シフトファイバ。

【請求項3】 前記クラッド領域は、前記外側コアの外周に設けられ、前記第2の屈折率よりも低い第3の屈折率を有する内側クラッドと、前記内側クラッドの外周に設けられ、該第3の屈折率よりも高い第4の屈折率を有する外側クラッドとを備えたことを特徴とする請求項2記載の分散シフトファイバ。

【請求項4】 前記外側コアの外径を2bとし、前記内側クラッドの外径を2cとすると、

$$1.2 \leq (2c/2b) \leq 2.2$$

なる関係を満たすことを特徴とする請求項3記載の分散シフトファイバ。

【請求項5】 前記内側コアの外径を2aとし、前記外側コアの外径を2bとすると、

$$0.4 \leq Ra (=2a/2b) \leq 0.8$$

$$5\mu m \leq 2b \leq 14\mu m$$

なる関係を満たすことを特徴とする請求項2 \sim 4のいずれか一項記載の分散シフトファイバ。

【請求項6】 前記クラッド領域又は前記外側クラッドに対する前記外側コアの屈折率差を Δn_1 とし、前記クラッド領域又は前記外側クラッドに対する前記内側コアの屈折率差を Δn_2 とすると、

$$\Delta n_1 - \Delta n_2 \geq 1\%$$

なる関係を満たすことを特徴とする請求項2 \sim 4のいずれか一項記載の分散シフトファイバ。

【請求項7】 前記クラッド領域又は外側クラッドに対する前記内側コアの屈折率差 Δn_1 は、 -0.4% 以下であることを特徴とする請求項6記載の分散シフトファイバ。

【請求項8】 前記信号光の導波方向に垂直な断面において、該信号光の基底モードの光パワー分布あるいはそれに伴う電磁界分布が最大になる部位は、前記コア領域の中心から半径方向に所定距離だけ離間した位置にある

ことを特徴とする請求項1 \sim 7のいずれか一項記載の分散シフトファイバ。

【請求項9】 前記コア領域中心における基底モードの光パワーを P_0 とし、該基底モードの光パワー分布の最大値を P_1 としたとき、

$$P_1 > 1.2 \times P_0$$

なる関係を満たすことを特徴とする請求項8記載の分散シフトファイバ。

【請求項10】 所定の基準軸に沿って伸びたコア領域と該コア領域の外周に設けられたクラッド領域とを備えるとともに、1.55 μ m波長帯の信号光を伝搬するための分散シフトファイバであって、

前記信号光の基底モードの光パワー分布が最大となる位置は、前記コア領域中心から径方向に所定距離離間しており、

前記コア領域中心における基底モードの光パワーを P_0 とし、該基底モードの光パワー分布の最大値を P_1 としたとき、

$$P_1 > 1.2 \times P_0$$

なる関係を満たす分散シフトファイバ。

【請求項11】 前記信号光の基底モードの光パワー分布が最大となる位置は、前記コア領域中心から径方向に沿って0.5 μ m \sim 5 μ m離間していることを特徴とする請求項9又は10記載の分散シフトファイバ。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】この発明は、光通信などで伝送路として使用されるシングルモード光ファイバに関し、特に、波長多重分割(WDM:Wavelength Division Multiplexing)伝送に好適な分散シフトファイバに関するものである。

【0002】

【従来の技術】従来から、伝送路としてシングルモード光ファイバが適用された光通信システムでは、通信用信号光として1.3 μ m波長帯または1.55 μ m波長帯の光が利用されることが多かった。ただし、最近では伝送路中における伝送損失低減の観点から1.55 μ m波長帯の光の使用が増しつつある。こうした1.55 μ m波長帯の光の伝送路に適用されるシングルモード光ファイバ(以下、1.55 μ m用シングルモード光ファイバという)では、1.55 μ m波長帯の光に対する、その波長分散(波長によって光の伝搬速度が異なるためパルス波が広がる現象)がゼロになるよう設計されている(ゼロ分散波長1.55 μ mの分散シフトファイバ)。

このような分散シフトファイバとして、例えば特公平3-18161号公報には、コア領域が内側コアと、該内側コアの屈折率よりも低い屈折率を有する外側コアとから構成された、デュアルシェイプコア構造の屈折率プロファイルを有する分散シフトファイバが提案されている。また、特開昭63-43107号公報や特開平2-

141704号公報には、クラッド領域が内側クラッドと、該内側クラッドよりも大きな屈折率を有する外側クラッドとから構成された、ディプレストクラッド・デュアルシェイブコア構造の屈折率プロファイルを有する分散シフトファイバ、さらに、「V.A.Bhagavatula et al., OFC'95 Technical Digest, Paper ThH1, 1995」や「P.Nouchi et al., ECOC'96, Paper MoB.3.2, 1996」には、リング状コア構造の屈折率プロファイルを有する分散シフトファイバが提案されている。

【0003】また、近年は、波長分割多重(WDM)伝送や光増幅器の登場により長距離伝送が可能になり、非線形光学効果を避けるため、上記のデュアルシェイブコア構造やディプレストクラッド・デュアルシェイブコア構造の屈折率プロファイルが採用され、かつゼロ分散波長が信号光の中心波長よりも短波長側あるいは長波長側にシフトされた分散シフトファイバも提案されている(特開平7-168046号公報、米国特許番号第5483612号公報)。なお、非線形光学効果とは、四光波混合(FWM: four-wave mixing)、自己位相変調(SPM: self-phase modulation)、相互位相変調(XPM: cross-phase modulation)などの非線形現象により、光強度の密度等に比例して信号光パルスが歪む現象であり、伝送速度や中継伝送システムにおける中継間隔の制約要因となる。

【0004】一方、特開平8-248251号公報には、光ファイバに大きなパワーの光が入射されたときに発生する上述の非線形光学現象の発現を抑制し、これら非線形光学現象に起因する光信号の歪みを低減する構造を備えた光ファイバが提案されている。このような光ファイバは、実効コア断面積 A_{eff} を約 $70\mu m^2$ よりも大きくするように設計された屈折率プロファイルを有する。【0005】なお、実効コア断面積 A_{eff} は、特開平8-248251号公報に示されたように、以下の(1)式で与えられる。

【0006】

【数1】

$$A_{eff} = 2\pi \left(\int_0^{\infty} E^2 r dr \right)^2 / \left(\int_0^{\infty} E^4 r dr \right) \quad \dots (1)$$

ただし、Eは伝搬光に伴う電界、rはコア中心からの径方向の距離である。

【0007】また、分散スロープは所定の波長帯域における分散特性を示すグラフの傾きで定義される。

【0008】

【発明が解決しようとする課題】一般に、実効コア断面積 A_{eff} が大きくなると、分散スロープも大きくなるが、従来から提案されている分散シフトファイバでは、分散による信号光波形の歪の発生と非線形光学効果による信号光波形の歪の発生とに関係する分散スロープ値を、波形全体における歪低減の観点から適性化する考慮

がなされていなかった。

【0009】したがって、通信の高度化に伴う今後の波長多重化の進展を鑑みると、従来の分散シフトファイバを単に適用するだけでは、伝送品質を維持し続けることが困難な事態が予想される。

【0010】この発明は上記のような課題を解決するためになされたもので、非線形光学現象の発現を効果的に抑制する構造を備えた、長距離海底ケーブル等に好適なWDM伝送用の分散シフトファイバを提供することを目的としている。

【0011】

【課題を解決するための手段】この発明に係る分散シフトファイバは、所定の基準軸に沿って伸びたコア領域と該コア領域の外周に設けられたクラッド領域とを備えた、 $1.55\mu m$ 波長帯の信号光(その中心波長が $1.55\mu m$ 波長帯である $1500nm \sim 1600nm$ の範囲内にある信号光)を伝搬するためのシングルモード光ファイバである。そして、当該分散シフトファイバは、その零分散波長が $1.55\mu m$ 波長帯の中心波長($1550nm$)から短波長側あるいは長波長側にシフトされている。

【0012】特に、この発明に係る分散シフトファイバは、 $1.55\mu m$ 波長帯の中心波長($1550nm$)における諸特性として、少なくとも、絶対値が $1.0 \sim 4.5 ps/nm/km$ である分散と、 $0.05 \sim 0.09 ps/nm^2/km$ の分散スロープと、 $70\mu m^2$ 以上の実効コア断面積と、そして、 $2m$ のファイバ長において、 $1300nm$ 以上のカットオフ波長とを有することを特徴としている。

【0013】一般に、波長多重伝送を行ったとき、分散スロープが小さいと四光波混合が発生しやすくなるため、信号光の波形が大きく歪んでしまう。逆に、分散スロープが大きい場合にも、分散の累積と自己位相変調との相乗効果により信号光の波形が大きく歪む。

【0014】発明者らが研究の結果として得た知見によれば、波長 $1550nm$ において、分散の絶対値が $1.0 \sim 4.5 ps/nm/km$ であり、実効コア断面積が $70\mu m^2$ 以上の場合、分散スロープが $0.05 \sim 0.09 ps/nm^2/km$ であると、長距離伝送にあたって、信号光波形の総歪量の低減を図ることができることが分った。なお、信号光波形の総歪量とは、四光波混合による信号光波形の歪と、分散の累積と自己位相変調との相乗効果による信号光波形の歪との和である。すなわち、上述の各特性を有する、この発明に係る分散シフトファイバによれば、非線形光学効果による歪の発生を抑制し、高品質の信号伝送が実現できる。

【0015】さらに、この発明に係る分散シフトファイバでは、上記コア領域が、第1の屈折率を有する内側コアと、該内側コアの外周に設けられ、第1の屈折率よりも高い第2の屈折率を有する外側コアとで構成されると

ともに、この外側コアの外周に第2の屈折率よりも低い屈折率を有するクラッド領域が設けられている。このことは、当該分散シフトファイバは、リング状コア構造の屈折率プロファイルを有するシングルモード光ファイバにより好適に実現可能であることを意味する。

【0016】また、デュアルシェイブコア構造あるいはディプレストクラッド・デュアルシェイブコア構造の屈

$$A_{eff} = k \cdot \pi \cdot (MFD/2)^2$$

ここで、 k ：補正係数

が成立することからも分る。なお、実効コア断面積 A_{eff} は上記(1)式により与えられる。

【0017】リング状コア構造の屈折率プロファイルを有する分散シフトファイバにおいて、内側コアの外径と外側コアの外径との比を一定に保ちつつコア径（外側コアの外径）を変化させたときに、発明者らは以下のような知見を得た。すなわち、コア径が小さい範囲では、コア径の増加に伴って実効コア断面積 A_{eff} は減少する。一方、コア径がある程度大きい範囲では、コア径の増加に伴って実効コア断面積 A_{eff} は増加する。これは、リング状コア構造の屈折率プロファイルを有する分散シフトファイバでは、同一の実効コア断面積 A_{eff} となるコア径が2つ存在することを意味する。

【0018】同様に、リング状コア構造の屈折率プロファイルを有する分散シフトファイバにおいて、内側コアの外径と外側コアの外径との比を一定に保ちつつコア径（外側コアの外径）を変化させると、分散スロープも変化する。すなわち、コア径が小さい範囲では、コア径の増大に応じて実効コア断面積 A_{eff} が減少するとともに、分散スロープも低減する。一方、コア径がある程度大きい範囲では、コア径の増大に応じて実効コア断面積 A_{eff} は増大するが、分散スロープは逆に低減する。これは、リング状コア構造の屈折率プロファイルを有する分散シフトファイバでは、実効コア断面積 A_{eff} の増大に応じて、分散スロープが低減するコア径の領域が存在することを意味する。

【0019】以上のことから、より大きくなるよう制御された実効コア断面積 A_{eff} を有するとともに、より小さくなるよう制御された分散スロープをともに有する分散シフトファイバを得ることは可能である。

【0020】結果的に、実効コア断面積 A_{eff} を所定の値に設定するにあたって、2つの異なる分散スロープ値から所望の分散スロープ値を適宜選択することは可能であり、この発明に係る分散シフトファイバの実現が容易となる。

【0021】さらに、リング状コア構造の屈折率プロファイルを有する分散シフトファイバにおいて、コア径が小さい範囲では、コア径の増加に伴って実効コア断面積 A_{eff} 及びMFDの双方が減少する。一方、コア径がある程度大きい範囲では、コア径の増加に伴って、MFDが減少しつつ、実効コア断面積 A_{eff} が増加する。な

折率プロファイルを有する分散シフトファイバでは、実効コア断面積 A_{eff} が大きくなることが知られているが、同時にモードフィールド径(MFD)も大きくなる。このことは、例えば、特開平8-220362号公報に開示されているように、実効コア断面積 A_{eff} とMFDとの間で、

$$\dots (2)$$

お、コア径（外側コアの外径）は、内側コアの外径と外側コアの外径との比が一定の状態を変えられている。一般に、MFDが小さく、かつ、カットオフ波長が長いほど、曲げ損失が小さくなるので、この観点からは、コア径を大きくする方が有利である。

【0022】具体的に発明者らの知見によれば、上述の各特性を有する分散シフトファイバを実現するためには、内側コアの外径を $2a$ とし、外側コアの外径を $2b$ とするとき、

$$0.4 \leq R_a (= 2a/2b) \leq 0.8$$

$$5 \mu m \leq 2b \leq 14 \mu m$$

なる関係を満たす必要がある。

【0023】また、当該分散シフトファイバは、上記クラッド領域に対する外側コアの比屈折率差を Δn_1 とし、クラッド領域に対する内側コアの比屈折率差を Δn_2 とするとき、

$$\Delta n_1 - \Delta n_2 \geq 1\%$$

なる関係を満たしている。すなわち、当該分散シフトファイバの分散値は、コア領域内の径方向の屈折率プロファイルにおいて、コア中心領域に相当する凹み領域の凹み量 $(\Delta n_1 - \Delta n_2)$ に依存するため、十分な分散値を得るためには、少なくとも該凹み量は1.0%以上である必要があるからである。なお、上述された内側コアの外径 $2a$ と外側コアの外径 $2b$ との関係は、比屈折率差 Δn_1 、 Δn_2 の値には依存しない。

【0024】さらに、クラッド領域に対する内側コアの比屈折率差 Δn_2 を小さく（負の絶対値を大きく）することは、カットオフ波長を短くする効果がある。したがって、短距離の光伝送を考慮すると、2mのファイバ長におけるカットオフ波長を1550nm以下にするため、 Δn_2 は-0.4%以下である必要がある。

【0025】ここで、上記クラッド領域は、単一構造（以下、マッチドクラッド構造という）とすることも可能であるが、外側コアの外周に設けられ、第2の屈折率（外側コアの屈折率）よりも低い第3の屈折率を有する内側クラッドと、該内側クラッドの外周に設けられ、第3の屈折率よりも高い第4の屈折率を有する外側クラッドとで構成してもよい。すなわち、当該分散シフトファイバの屈折率プロファイルは、ディプレストクラッド・リング状コア構造（2重構造）の屈折率プロファイルとすることも可能である。

【0026】このとき、ディプレストクラッド構造の屈折

率プロファイルを有する分散シフトファイバは、凹みを伴わないマッチドクラッド構造の屈折率プロファイルを有する分散シフトファイバと比較して、不要な2次モードを低減させる効果があるため、係るディプレストクラッド構造は2次モードのカットオフ波長を短くしたい場合に有効である。しかしながら、ディプレストクラッド構造の屈折率プロファイルにおいて、設けられる凹みの幅（内側クラッドの径方向の厚み（ $c-b$ ）に対応）が狭すぎる場合（ $2c/2b$ が1に近づく場合）、あるいは広すぎる場合（ $2c/2b$ が大きくなり過ぎた場合）は、いずれもマッチドクラッド構造に対するディプレストクラッド構造の効果は得られない。そのため、内側クラッドは外側コアに対して適度な外径を持つ必要があり、ディプレストクラッド・リング状コア構造の屈折率プロファイルを有する分散シフトファイバは、外側コアの外径を $2b$ とし、内側クラッドの外径を $2c$ とすると、

$$1. 2 \leq (2c/2b) \leq 2.2$$

なる関係を満たすことが好ましい。

【0027】また、ディプレストクラッド・リング状コア構造の屈折率プロファイルを有する分散シフトファイバにおいては、上記 Δn_1 は外側クラッドに対する外側コアの比屈折率差であり、上記 Δn_2 は外側クラッドに対する内側コアの比屈折率差である。この場合、比屈折率差 Δn_1 、 Δn_2 が同じ値であっても、ディプレストクラッド構造を有さない単純リング状コア構造（マッチドクラッド・リング状コア構造）の屈折率プロファイルを有する分散シフトファイバと比較して、そのカットオフ波長は短くなる。

【0028】次に、上記特開平8-248251号公報に開示された従来の光ファイバにおける光パワー分布

（あるいは電磁界分布）は、該光ファイバのコア中心が最大となっている。このような特徴を有する光パワー分布の形状を維持したまま実効コア断面積 A_{eff} を拡大するためには、該光パワー分布における裾部分を広げる必要がある。このように光パワー分布における裾部分を広げるため、当該従来の光ファイバには、中央セグメント（内側コア）の外側に別のセグメント（外側コア）を設けられている。

【0029】ところが、上記（2）式からも明らかなように、上述のデュアルシェイブコア構造あるいはディプレストクラッド・デュアルシェイブコア構造の屈折率プ

$$P_1 > 1.2 \times P_0$$

なる関係が満たされている。

【0035】これにより、当該分散シフトファイバのMFDを小さい値に保ったまま、実効コア断面積 A_{eff} を大きくすることが可能となるため、曲げ損失を増大させることなく、非線形光学現象を低減させることが可能となる。

【0036】なお、この発明に係る分散シフトファイバ

ロファイルを有する分散シフトファイバでは、実効コア断面積 A_{eff} を大きくすると、同時にモードフィールド径（MFD）も大きくなってしまふ。

【0030】以上の理由により、実効コア断面積 A_{eff} を拡大するよう設計された上記特開平8-248251号公報の光ファイバにおいては、該実効コア断面積 A_{eff} の拡大に伴ってマイクロバンドあるいはマクロバンドによる損失（以下、曲げ損失という）が増加してしまうという課題があった。

【0031】そこで、この発明に係る分散シフトファイバは、MFDの値を小さく維持したまま非線形光学現象の発現を効果的に抑制するため、少なくともリング状コア構造の屈折率プロファイルを有し、この構造により、信号光の導波方向に垂直な断面において、信号光の基底モードの光パワー分布あるいはそれに伴う電磁界分布が最大となる部位が、前記コア領域の中心から半径方向に所定距離だけ離間していることを特徴としている。

【0032】なお、リング状コア構造の屈折率プロファイルを有する光ファイバであっても、内側コアの外径が小さいと、リング状コア構造ではない屈折率プロファイルを有する光ファイバと比較して、伝搬光の光パワー分布あるいはそれに伴う電磁界分布に大きな差は生じない。すなわち、リング状コア構造の屈折率プロファイルを有する光ファイバであっても、内側コアの外径が小さいと、信号光の基底モードの光パワー分布あるいは電磁界分布が最大となる部位が、コア領域の中心と略重なるってしまう。こうした状態では、リング状コア構造の屈折率プロファイルの特徴が十分には発揮されない。

【0033】具体的に、この発明に係る分散シフトファイバでは、信号光の導波方向に垂直な断面において、信号光の基底モードの光パワー分布あるいはそれに伴う電磁界分布が最大となる部位が、該コア領域の中心から半径方向に $0.5 \mu\text{m} \sim 5 \mu\text{m}$ 程度離間している。

【0034】この場合、以下の（3）式の条件を満たすことが、リング状コア構造の屈折率プロファイルの効果を十分に発揮させるために特に好適である。すなわち、この発明に係る分散シフトファイバでは、コア領域の中心における信号光の基底モードの光パワーあるいはそれに伴う電磁界の強度を P_0 とし、該コア領域の中心から半径方向の、該信号光の基底モードの光パワー分布あるいはそれに伴う電磁界分布の最大値を P_1 としたとき、

$$\dots (3)$$

は、上記 $1.55 \mu\text{m}$ 波長帯における中心波長（ 1550 nm ）から所定量だけその零分散波長がシフトされた分散シフトファイバである。このように、実効コア断面積 A_{eff} の拡大と零分散波長のシフトを併用することにより、4光波混合による信号の劣化をより効果的に抑制することが可能となる。

【0037】

【発明の実施の形態】以下、この発明に係る分散シフトファイバの各実施形態を、図1～図18を用いて説明する。なお、図面の説明にあたって同一の要素には同一の符号を付し、重複する説明を省略する。

【0038】（第1実施形態）図1は、この発明に係る分散シフトファイバの第1実施形態の断面構造及び径方向の屈折率プロファイルを示す図である。図1に示されたように、この分散シフトファイバ100は、1.55 μm 波長帯（1500～1600 nm）の信号光を伝搬するための石英ガラスを主成分とするシングルモード光ファイバであって、外径が2 a、屈折率 n_1 を有する内側コア111と、該内側コア111の外周に設けられ、その外径が2 b（すなわち、コア領域110の径=2 b）、屈折率 n_2 （ $>n_1$ ）を有する外側コア112と、そして、該外側コア112の外周に設けられ、屈折率 n_3

$$\Delta n_1 = (n_1' - n_1) / (2 n_1') \quad \dots (4)$$

で定義される、クラッド領域210に対する外側コア112の比屈折率差 Δn_1 を1.5%、コア径（外側コア112の外径2 b）を9 μm 、内側コア111の外径2

分散 (ps/nm/km)	: -2.28
分散スロープ (ps/nm ² /km)	: 0.082
実効コア断面積 (μm^2)	: 78.2
MFD (μm)	: 6.2
2 m長におけるカットオフ波長 (nm)	: 2510

となる。なお、この明細書において、比屈折率差は百分率で表示されている。

【0041】この好適な例では、上記カットオフ波長は2510 nmであり、2 mのファイバ長においては1.55 μm 帯の信号光に対してシングルモードの伝搬が保障できないが、当該カットオフ波長は伝送距離が長くなると短くなるものであり、1000 km程度といった長距離伝送の場合には、カットオフ波長が信号光の波長よりも短くなるため、実用上問題はない（シングルモードの伝搬が保障できる）。

【0042】図2は、コア径2 b（=外側コア112の外径）を変化させた場合の実効コア断面積 A_{eff} 及びモードフィールド径（MFD）の変化を示すグラフである。なお、図2においては、比屈折率差 $\Delta n_1 = 1.5\%$ 、 $Ra (=a/b) = 0.6$ としている。

【0043】図2から、コア径2 bが4 μm 以下である範囲では、コア径2 bの増加に伴って実効コア断面積 A_{eff} 及びMFDは共に減少する。一方、コア径2 bが4 μm よりも大きい範囲では、コア径2 bの増加に伴って、MFDは減少するが実効コア断面積 A_{eff} は逆に増加することが確認できる。すなわち、同一の実効コア断面積 A_{eff} となるコア径2 bが2つ存在することが分る。

【0044】図3は、コア径2 bを変化させた場合の2 mのファイバ長でのカットオフ波長 λ_c 及び分散スロープの変化を示すグラフである。なお、図3においては、

、 $(<n_1)$ を有するクラッド領域210とを備えている。なお、コア領域110は、上記内側コア111及び外側コア112により構成されている。また、屈折率プロファイル101が図中の線11上の各部位における屈折率を示す。

【0039】そして、当該分散シフトファイバ100は、波長1550 nmにおける諸特性として、分散の絶対値が1.0～4.5 ps/nm/kmの範囲内に、分散スロープが0.05～0.09 ps/nm²/kmの範囲内に、実効コア断面積が70 μm^2 以上に、そして、2 mのファイバ長におけるカットオフ波長が1300 nm以上に、それぞれ設定されている。

【0040】好適な例としては、屈折率 n_1 =屈折率 n_2 （クラッド領域210に対する内側コア111の比屈折率差 $\Delta n_1 = 0$ ）とし、

aとコア110の径2 bとの比 $Ra (=a/b)$ を0.6とすると、波長1550 nmにおいて、

比屈折率差 $\Delta n_1 = 1.5\%$ 、 $Ra (=a/b) = 0.6$ としている。

【0045】図3から、コア径2 bの増加に伴ってカットオフ波長 λ_c は増加することが確認できる。一方、分散スロープは、コア径2 bの増加に伴って、コア径2 b $\leq 4 \mu\text{m}$ の範囲では減少し、4 $\mu\text{m} < \text{コア径} 2 b \leq 7 \mu\text{m}$ の範囲では増加し、コア径2 b $> 7 \mu\text{m}$ の範囲では減少することが確認できる。

【0046】したがって、図2及び図3から、一般に、実効コア断面積 A_{eff} を所定の値とするにあたって、2つの異なる分散スロープ値から所望の分散スロープ値を選択が可能となることが分る。

【0047】図4は、分散スロープの変化に伴う、5 Gbpsでのビット誤り率（BER: bit error rate）の変化を説明するための図である。測定にあたっては、16波の信号光（中心波長=1557.2 nm、波長間隔=0.55 nm）の伝送において、中心波長での分散値=-2 ps/nm/km、実効コア断面積=70 μm^2 で、分散スロープ (ps/nm²/km) を0.03（図4 (a) 参照）、0.05（図4 (b) 参照）、0.09（図4 (c) 参照）、0.12（図4 (d) 参照）と変化させている。また、測定対象となる分散シフトファイバの伝送距離は9000 kmとし、中心波長での累積分散を零とすべく、400 kmごとに分散補償用の光ファイバ（実際には、中心波長での分散値が18 ps/nm/kmの1.3 μm 帯用のシングルモード光フ

ファイバ)が挿入されている。なお、図4では、縦軸にビット誤り率と等価な量であるQ値が使用されている。

【0048】図5は、上記Q値を説明するための図である。図に示されたように、Q値は、受信端での信号光の

$$Q \text{ (dB)} = 10 \times \log \left((v_1 - v_0) / (\sigma_1 + \sigma_0) \right) \quad \dots (5)$$

で定義される。

【0049】なお、光伝送においては、上記の伝送距離でBERが 10^{-1} 以下であれば十分な性能であり、BERで 10^{-1} 以下はQ値で15.7dB以上に相当している。

【0050】図4から分るように、分散スロープの値が小さいと中心チャンネルでQ値の劣化が大きく、また、分散スロープの値が大きいと長波長領域でQ値の劣化が大きい。これは、分散スロープの値が小さいと、中心チャンネル付近の波長で四光波混合が発生しやすいためであり、また、分散スロープの値が大きいと、チャンネル番号14~16といった長波長領域で分散値が大きくなることにより累積分散が大きくなることと自己位相変調との相乗効果が発生するためと考えられる。

【0051】したがって、信号光の波長帯域でのBER

$$P_1 \approx 5.5 \times P_0 > 1.2 \times P_0$$

となり、上記(3)式の条件を満たしている。

【0054】図7は、比屈折率差 $\Delta n_1 = 1.5\%$ ($n_1 = n_2$)、 $Ra (=a/b) = 0.6$ の光ファイバであって、図6の分散シフトファイバと同じ実効コア断面積 $A_{eff} (=78 \mu m^2)$ を有する比較例の光ファイバの信号光の基底モードの光パワー分布を説明するための図である。

【0055】図7に示されたように、比較例の光ファイバは、外径(2a)が $1.36 \mu m$ 、屈折率 n_1 を有する内側コア191と、該内側コア191の外周に設けられ、外径(2b)が $2.26 \mu m$ (すなわち、コア領域190の径 $=2.26 \mu m$)、屈折率 $n_2 (>n_1)$ を有

$$P_1 = P_0 < 1.2 \times P_0$$

となり、上記(3)式の条件を満たしていない。

【0058】この光ファイバにおける分散スロープは、 $0.126 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ であり、この光ファイバでは上述の好適なBERを達成できない。

【0059】それゆえ、基底モードの半径方向における光パワー分布が中心部に凹部を有するような屈折率プロファイルを積極的に利用することにより、実効コア断面積 A_{eff} が大きく、かつ、分散スロープが小さい分散シフトファイバを実現することができる。

$$\Delta n_1 = (n_1' - n_1'') / (2n_1') \quad \dots (8)$$

で定義される、クラッド領域に対する外側コア112の

$$\Delta n_2 = (n_1' - n_1'') / (2n_1') \quad \dots (9)$$

で定義される、クラッド領域に対する内側コア111の比屈折率差 Δn_1 を -0.6% 、コア径2b(外側コアの外径) $=6.8 \mu m$ 、内側コア111の外径2aと分散値($\text{ps/nm}^2/\text{km}$)

波形のアイパターンにおいて、論理"0"レベルの光強度の平均値 v_0 、論理"0"レベルの光強度の標準偏差 σ_0 、論理"1"レベルの光強度の平均値 v_1 、及び論理"1"レベルの光強度の標準偏差 σ_1 として、

の低減、すなわち、該波長帯域におけるQ値の向上のためには、適当な分散スロープの値があることが分る。具体的には、図4において、上記で十分な性能としたBERが 10^{-1} 以下となる分散スロープの値は、 $0.05 \sim 0.09 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ であることが分る。

【0052】図6は、上記の好適な例の信号光の基底モードの光パワー分布を説明するための図である。図6に示されたように、信号光の導波方向に垂直な断面において、信号光の基底モードの光パワー分布(信号光の伝搬に伴う電磁界分布と等価)が最大となる部位は、コア領域110の中心から半径方向に所定距離だけ離れた位置に設定されている。

【0053】そして、コア領域110の中心における信号光の基底モードの光パワーを P_0 とし、該光パワー分布の最大値を P_1 とした場合に、

$$\dots (6)$$

する外側コア192と、そして、該外側コア192の外周に設けられ、屈折率 $n_1 (<n_2)$ を有するクラッド領域290とを備える。ここで、コア領域190は、上記内側コア191及び外側コア192で構成されている。

【0056】図7から分るように、比較例の光ファイバでは、信号光の導波方向に垂直な断面において、信号光の基底モードの光パワー分布が、コア領域190の中心で最大となっている。

【0057】そして、コア領域190の中心における信号光の基底モードの光パワーを P_0 とし、該信号光の基底モードの光パワー分布の最大値を P_1 とした場合に、

$$\dots (7)$$

【0060】なお、以上の第1実施形態の説明では、内側コア111の屈折率 n_1 とクラッド210の屈折率 n_2 とが同一の屈折率プロファイルについて説明したが、この屈折率プロファイルは、図8(a)に示されたように、屈折率 $n_1 > \text{屈折率 } n_2$ とすることも可能である。また、この屈折率プロファイルは、図8(b)に示されたように、屈折率 $n_1 < \text{屈折率 } n_2$ であってもよい。

【0061】例えば、図8(b)の分散シフトファイバにおいて、

$$\dots (8)$$

比屈折率差 Δn_1 を 1.1% 、

$$\dots (9)$$

ア110の径2bとの比 $Ra (=a/b) = 0.6$ とすると、 1550 nm において、

$$:-2.18$$

分散スロープ (ps/nm²/km)
 実効コア断面積 (μm²)
 MFD (μm)
 2m長におけるカットオフ波長 (nm)

: 0.086
 : 81.4
 : 7.6
 : 1500

となる。

【0062】この例では、2mのファイバ長でのカットオフ波長が1500nmであり、1.55μm帯の信号光の波長よりも短いので、短距離の伝送にも用いることができる。

【0063】(第2実施形態)図9は、この発明に係る分散シフトファイバの第2実施形態の断面構造及び径方向の屈折率プロファイルを示す図である。図9に示されたように、この分散シフトファイバ200は、1.55μm波長帯の信号光を伝搬するためのシングルモード光ファイバであって、特に、ディプレストクラッド・リング状コア構造の屈折率プロファイル201を有する。すなわち、第2実施形態の分散シフトファイバ200は、外径2a、屈折率 n_1 を有する内側コア121と、該内側コア121の外周に設けられ、外径2b(すなわち、コア領域120の径=2b)、屈折率 n_2 ($> n_1$)を有する外側コア122と、該外側コア122の外周に設けられ、外径2c、屈折率 n_3 ($< n_1$)を有す

$$\Delta n_1 = (n_1^1 - n_1^2) / (2n_1^1) \quad \dots (10)$$

で定義される、外側クラッド222に対する外側コア1

$$\Delta n_2 = (n_1^2 - n_1^3) / (2n_1^2) \quad \dots (11)$$

で定義される、外側クラッド222に対する内側コア121の比屈折率差 Δn_1 を-0.4%、コア径2b(外側コア122の外径)を9μm、内側コア121の外径

分散値 (ps/nm/km) : -2.62
 分散スロープ (ps/nm²/km) : 0.076
 実効コア断面積 (μm²) : 80.1
 MFD (μm) : 6.3
 2m長におけるカットオフ波長 (nm) : 1702

となる。

【0066】この好適な例では、上記カットオフ波長が1702nmであり、2mのファイバ長においては1.55μm帯の信号光に対してシングルモードの伝搬が保障されていないが、当該カットオフ波長は伝送距離が長くなると短くなるものであり、数100m以上の距離を伝送する場合には、カットオフ波長が信号光の波長よりも短くなるため、実用上問題はない。

【0067】この第2本実施形態のようなディプレストクラッド・リング状コア構造の屈折率プロファイルを有する分散シフトファイバにおいて、コア径2bを変化させた場合の実効コア断面積 A_{eff} 及びMFDの変化は、第1実施形態と同様の、すなわち、図2に示された変化と同様の傾向を示す。したがって、このような分散シフトファイバの場合も、同一の実効コア断面積 A_{eff} となるコア径2bが2つ存在する。

【0068】また、この第2実施形態のようなディプレ

る内側クラッド221と、そして、該内側クラッド221の外周に設けられ、屈折率 n_1 ($> n_3$)を有する外側クラッド222とを備えている。ここで、コア領域120は、上記内側コア121及び外側コア122により構成され、そして、クラッド領域220は、上記内側クラッド221及び外側クラッド222により構成されている。また、屈折率プロファイル201は、図中の線L2上の各部位における屈折率を示す。

【0064】そして、当該分散シフトファイバ200は、波長1550nmにおける諸特性として、分散の絶対値が1.0~4.5ps/nm/kmの範囲内に、分散スロープが0.05~0.09ps/nm²/kmの範囲内に、実効コア断面積が70μm²以上であり、そして、2mのファイバ長におけるカットオフ波長が1300nm以上に設定されている。

【0065】好適な例としては、屈折率 n_1 =屈折率 n_3 とし、

22の比屈折率差 Δn_1 を1.1%、

2aとコア領域120の径2bとの比 R_a ($=a/b$)を0.6、内側クラッド221の外径2cを18μmとすると、波長1550nmにおいて、

分散値 (ps/nm/km) : -2.62
 分散スロープ (ps/nm²/km) : 0.076
 実効コア断面積 (μm²) : 80.1
 MFD (μm) : 6.3
 2m長におけるカットオフ波長 (nm) : 1702

ストクラッド・リング状コア構造の屈折率プロファイルを有する分散シフトファイバにおいて、コア径2bを変化させたときの、2m長でのカットオフ波長 λ_c 及び分散スロープの変化は、上述された第1実施形態と同様の变化、すなわち、図3に示された変化と同様の傾向を示す。したがって、このような分散シフトファイバの場合も、一般に、実効コア断面積 A_{eff} を所定の値とするにあたって、2つの異なる分散スロープ値から所望の分散スロープ値の選択が可能である。

【0069】さらに、この第2本実施形態のようなディプレストクラッド・リング状コア構造の屈折率プロファイルを有する分散シフトファイバにおいて、分散スロープの変化による、5GbpsでのBERの変化は、第1実施形態と同様の变化、すなわち、図4に示された変化と同様の傾向を示す。したがって、このような分散シフトファイバの場合も、BERが10⁻¹以下となる分散スロープ値は、0.05~0.09ps/nm²/kmで

ある。

【0070】図10は、この第2実施形態の好適な例の信号光の基底モードの光パワー分布を説明するための図である。図10に示されたように、第1実施形態での図6と同様に、信号光の導波方向に垂直な断面において、信号光の基底モードの光パワー分布が最大となる部位

$$P_1 \approx 5.3 \times P_0 > 1.2 \times P_0$$

となり、上記(3)式の条件を満たしている。

【0072】この第2本実施形態のようなディプレストクラッド・リング状コア構造の屈折率プロファイルを有する分散シフトファイバにおいても、比屈折率差 $\Delta n_1 = 1.1\%$ 、比屈折率差 $\Delta n_2 = -0.4\%$ 、 $Ra (= a/b) = 0.6$ の光ファイバであって、図10の分散シフトファイバと同じ実効コア断面積 $A_{eff} (= 80.1 \mu m^2)$ を有する比較例の光ファイバでは、信号光の導波方向に垂直な断面において、信号光の基底モードの光パワー分布が、コア領域の中心付近で最大となるため、その分散スロープは上述の好適なBERを達成できない。

【0073】それゆえ、基底モードの半径方向における光パワー分布が中心部に凹部を有するような屈折率プロファイルを積極的に利用することにより、実効コア断面積 A_{eff} が大きく、かつ、分散スロープが小さい分散シフトファイバを実現することができる。

【0074】なお、以上の第2実施形態の説明では、内側コア121の屈折率 n_1 と内側クラッド221の屈折率 n_2 とが同一の屈折率プロファイルについて説明したが、この屈折率プロファイルは、図11(a)に示されたように、屈折率 $n_1 >$ 屈折率 n_2 とすることも可能である。また、この屈折率プロファイルは、図11(b)に示されたように、屈折率 $n_1 <$ 屈折率 n_2 としてもよい。

【0075】ただし、図11に示されたようなディプレスクラッド構造の屈折率プロファイルにおいて、該屈折率プロファイルに設けられる凹みの幅(内側クラッドの径方向の厚み $(c-b)$ に相当)及び深さ(外側クラッドに対する内側クラッドの比屈折率差に相当)は、それぞれ適切な範囲に設定されなければならない。

【0076】すなわち、ディプレスクラッド構造の屈折率プロファイルを有する分散シフトファイバは、凹みを伴わないマッチドクラッド構造の屈折率プロファイルを

$$\Delta n_1 = (n_1' - n_1) / (2n_1) \quad \dots (13)$$

で定義される、外側クラッド222に対する外側コア122の比屈折率差 Δn_1 を 0.97% 、

$$\Delta n_2 = (n_2' - n_2) / (2n_2) \quad \dots (14)$$

で定義される、外側クラッド222に対する内側コア121の比屈折率差 Δn_2 を -0.45% 、

$$\Delta n_3 = (n_3' - n_3) / (2n_3) \quad \dots (15)$$

で定義される、外側クラッド222に対する内側クラッド221の比屈折率差 Δn_3 を -0.20% 、コア径 $2b$ (外側コア122の外径) を $8 \mu m$ 、内側コア121の外径 $2a$ とコア領域120の径 $2b$ との比 $Ra (= a$

分散値 $(ps/nm/km)$

を、コア領域120の中心から半径方向に所定距離だけ離れた位置に設定されている。

【0071】そして、コア領域120の中心における信号光の基底モードの光パワーを P_0 とし、該光パワー分布の最大値を P_1 とした場合に、

$$\dots (12)$$

有する分散シフトファイバと比較して、不要な2次モードを低減させる効果があるため、係るディプレストクラッド構造は2次モードのカットオフ波長を短くしたい場合に有効である。しかしながら、ディプレストクラッド構造の屈折率プロファイルにおいて、設けられる凹みの幅(内側クラッドの径方向の厚み $(c-b)$ に対応)が狭すぎる場合 $(2c/2b$ が1に近づく場合)、あるいは広すぎる場合 $(2c/2b$ が大きくなり過ぎた場合)は、いずれもマッチドクラッド構造に対するディプレストクラッド構造の効果は得られない。そのため、内側クラッドは外側コアに対して適度な外径を持つ必要があり、ディプレストクラッド・リング状コア構造の屈折率プロファイルを有する分散シフトファイバは、外側コアの外径を $2b$ とし、内側クラッドの外径を $2c$ とするとき、

$$1.2 \leq (2c/2b) \leq 2.2$$

なる関係を満たすことが好ましい。

【0077】加えて、この発明に係る分散シフトファイバは、上記クラッド領域(あるいは外側クラッド)に対する外側コアの比屈折率差 Δn_1 と、クラッド領域(あるいは外側クラッド)に対する内側コアの比屈折率差 Δn_2 との間で、

$$\Delta n_1 - \Delta n_2 \geq 1\%$$

なる関係を満たすのが好ましい。

【0078】すなわち、当該分散シフトファイバの分散値は、コア領域内の径方向の屈折率プロファイルにおいて、コア中心領域に相当する凹み領域の凹み量 $(\Delta n_1 - \Delta n_2)$ に依存するため、十分な分散値を得るためには、少なくとも該凹み量は 1.0% 以上である必要があるからである。

【0079】例えば、図11(b)に示された屈折率プロファイルを有する分散シフトファイバにおいて、

$$\dots (13)$$

22の比屈折率差 Δn_1 を 0.97% 、

$$\dots (14)$$

21の比屈折率差 Δn_2 を -0.45% 、

$$\dots (15)$$

$/b)$ を 0.6 、コア領域120の外径 $2b$ と内側クラッド221の外径 $2c$ との比 $(2c/2b)$ を 2.0 とすると、波長 1550 nm において、

$$:-1.88$$

分散スロープ ($p_s / nm^2 / km$)	: 0.077
実効コア断面積 (μm^2)	: 83.0
MFD (μm)	: 7.2
2m長におけるカットオフ波長 (nm)	: 1473

となる。

【0080】そして、コア領域120の中心における信

$$P_1 \approx 3: 6 \times P_0 > 1: 2 \times P_0$$

となり、上記(3)式の条件を満たしている。

$$\Delta n_1 = (n_1^2 - n_2^2) / (2n_1^2) \quad \dots (17)$$

で定義される、外側クラッド222に対する外側コア110の比屈折率差 Δn_1 を0.90%、

$$\Delta n_2 = (n_2^2 - n_3^2) / (2n_2^2) \quad \dots (18)$$

で定義される、外側クラッド222に対する内側コア121の比屈折率差 Δn_2 を-0.45%、

$$\Delta n_3 = (n_3^2 - n_4^2) / (2n_3^2) \quad \dots (19)$$

で定義される、外側クラッド222に対する内側クラッド221の比屈折率差 Δn_3 を-0.45%、コア径2b(外側コア122の外径)を8.3 μm 、内側コア121の外径2aとコア領域120の径2bとの比Ra

分散値 ($p_s / nm / km$)	: -2.19
分散スロープ ($p_s / nm^2 / km$)	: 0.069
実効コア断面積 (μm^2)	: 77.2
MFD (μm)	: 7.0
2m長におけるカットオフ波長 (nm)	: 1476

となる。

【0082】そして、コア領域120の中心における信

$$P_1 \approx 3: 2 \times P_0 > 1: 2 \times P_0$$

となり、上記(3)式の条件を満たしている。

【0083】さらに、クラッド領域(あるいは外側クラッド)に対する内側コアの比屈折率差 Δn_1 を小さく

(負の絶対値を大きく)することは、カットオフ波長を短くする効果がある。したがって、短距離の光伝送を考慮すると、2mのファイバ長におけるカットオフ波長を1550nm以下にするため、 Δn_1 は-0.4%以下である必要がある。

【0084】次に、上述された各分散シフトファイバが得られる諸特性として、 Δn_1 、 Δn_2 、Ra(=2a/2b)、及び2bの許容範囲を図12に示す。なお、リング状コア構造の屈折率プロファイルを有する分散シフトファイバの場合、 Δn_1 はクラッド領域に対する外側コアの比屈折率差であり、 Δn_2 はクラッド領域に対する内側コアの比屈折率差である。また、ディプレストクラッド・リング状コア構造の屈折率プロファイルを有する分散シフトファイバの場合、 Δn_1 は外側クラッドに対する外側コアの比屈折率差であり、 Δn_2 は外側クラッドに対する内側コアの比屈折率差である。

【0085】図12(a)の表からも分るように、上述の諸特性を得るための内側コアの外径2aと外側コアの外径2b(=コアの径)は、以下の関係を満たす必要がある。

$$0.4 \leq Ra (= 2a/2b) \leq 0.8 \\ 5 \mu m \leq 2b \leq 14 \mu m$$

号光の基底モードの光パワーを P_0 とし、該光パワー分布の最大値を P_1 とした場合に、

$$\dots (16)$$

【0081】さらに、

$$\dots (17)$$

で定義される、外側クラッド222に対する外側コア110の比屈折率差 Δn_1 を0.90%、

$$\dots (18)$$

で定義される、外側クラッド222に対する内側コア121の比屈折率差 Δn_2 を-0.45%、

$$\dots (19)$$

(=a/b)を0.6、コア領域120の外径2bと内側クラッド221の外径2cとの比(2c/2b)を1.5とすると、波長1550nmにおいて、

分散値 ($p_s / nm / km$)	: -2.19
分散スロープ ($p_s / nm^2 / km$)	: 0.069
実効コア断面積 (μm^2)	: 77.2
MFD (μm)	: 7.0
2m長におけるカットオフ波長 (nm)	: 1476

号光の基底モードの光パワーを P_0 とし、該光パワー分布の最大値を P_1 とした場合に、

$$\dots (20)$$

なお、上記関係は比屈折率差 Δn_1 、 Δn_2 には依存しない関係である。上記関係を満たさない場合、上述された当該分散シフトファイバの諸特性は得られない。すなわち、図12(b)に示されたグラフにおいて、斜線で示された領域が内側コアの外径2aと外側コアの外径2b(=コアの径)の上記関係を満たしている領域であり、例えば、Ra(=2a/2b)及び2bの値が、(a)図12(b)中のAで示された領域にある場合、分散スロープの値が大きくなりすぎ、(b)図12(b)中のBで示された領域にある場合、実効コア断面積 A_{eff} が大きくなり過ぎるとともに曲げ損失も増大し、(c)図12(b)中のCで示された領域にある場合、分散値が大きくなりすぎ、(d)図12(b)中のDで示された領域にある場合、実効コア断面積 A_{eff} が小さくなりすぎてしまう。

【0087】加えて、上述の構造を備えた、この発明に係る分散シフトファイバは、信号光の基底モードの光パワー分布が最大となる位置が、コア領域中心から径方向に所定距離だけ離間するよう、その屈折率プロファイルが調整されている。具体的に、発明者らは電磁界分布(光パワー分布に相当)の形状が近似的にガウス分布と見做せ、かつその電磁界分布が最大となる位置がコア領域中心から所定距離だけ離間している複数の光ファイバを試作した。図13は試作された複数の光ファイバにおける電磁界分布の典型例(グラフ)である。なお、この

グラフにおいて、縦軸の電界振幅は最大値を1として規格化されている。

【0088】発明者らは、試作されたこれら光ファイバから実効コア断面積 A_{eff} が約 $80\mu m^2$ 程度の光ファイバをさらに選別し、これら選別された光ファイバについて電磁界分布の最大位置とコア領域中心との距離と、モードフィールド径(MFD)の関係を調査した。なお、図14は、MFDの距離依存性を示すグラフであり、図15は、マイクロバンドによる損失の距離依存性を示すグラフである。図14に示されたように、電磁界分布の最大位置とコア領域中心との距離が $0.5\mu m \sim 2.5\mu m$ 程度まで、距離の増加に従ってMFDは減少し、この発明に係る分散シフトファイバでは、従来の光ファイバと同等の実効コア断面積 A_{eff} を維持しつつ、MFDを小さくできることが確認された。

【0089】一方、図15に示されたように、マイクロバンドによる損失は、コア領域の中心から該電磁界分布が最大となる位置までの距離が増加するに従って減少す

$$\Delta n' = (n_1^2 - n_{cl,0}^2) / (2n_{cl,0}^2) \quad \dots (21)$$

$$\Delta n' = (n_2^2 - n_{cl,0}^2) / (2n_{cl,0}^2) \quad \dots (22)$$

ここで、 n_1 は内側コアの屈折率、 n_2 は内側コアの外周に設けられた外側コアの屈折率、 $n_{cl,0}$ は外側コアの外周に設けられたクラッド領域の屈折率であり、各値は百分率で表示されている。また、各式中の屈折率は順不同であるため、該比屈折率差が負の値をとる場合には、該ガラス領域の屈折率がクラッド領域の屈折率よりも低いことを意味する。なお、ディプレストクラッド構造の屈

$$\langle N \rangle = \langle N_0 \rangle + \langle N_2 \rangle \cdot E^2$$

ここで、 $\langle N_0 \rangle$ ：線形分極に対する屈折率

$\langle N_2 \rangle$ ：3次の非線形分極に対する非線形屈折率

E ：光電場振幅

で表される。強い光の下では、媒質の屈折率 $\langle N \rangle$ は通常の値 $\langle N_0 \rangle$ と光電場振幅 E の2乗に比例する増加分との和で与えられる。特に、第2項の比例定数 $\langle N_2 \rangle$ (単位： m^2/V^2)が非線形屈折率と呼ばれる。

【0094】図17は、図16の表に示されたサンプル1の屈折率プロファイルと中心から径方向に沿った光パワーとの関係を示したグラフである。なお、光パワーの数値は最大値を1として規格化されており、該光パワーは信号光の基底モード(LP01)と2次モード(LP11)が示されている。また、サンプル1及び2とも、1重リング構造を備えており、コア中心(内側コア)よりも外側にある屈折率が最大となるガラス部分(外側コア)の近傍は純石英ガラスに酸化ゲルマニウムが添加され、屈折率が上昇している。一方、コア中心(内側コア)付近は純石英ガラスにフッ素が添加され屈折率が低下している。

【0095】サンプル1の光ファイバでは、 $1.55\mu m$ ($1.55\mu m$ 波長帯の中心波長： $1550nm$)の光に対して、その実効コア断面積 A_{eff} が $87\mu m^2$ 、 E

る。したがって、マイクロバンドによる損失を考慮すると、コア領域中心から電磁界分布が最大となる位置までの距離はより大きい方が好ましいが、該距離が $5\mu m$ を越えると、カットオフ波長が極端に信号光波長よりも長波長側にシフトするため、シングルモードでの光伝送が確保できなくなる。

【0090】以上のことを考慮して、この発明に係る分散シフトファイバは、信号光の基底モードの光パワー分布が最大となる位置が、コア領域中心から径方向に $0.5\mu m \sim 5\mu m$ だけ離間するよう設計されている。

【0091】次に、図16に1重リング構造の屈折率プロファイルを有する2つのサンプルについて、 $1.55\mu m$ ($1550nm$)の光に対する各諸特性を測定した結果をに示す。なお、この表において、 $\Delta n'$ 及び $\Delta n'$ 、それぞれクラッド領域に対する内側コア、外側コアの比屈折率差であり、以下のように定義されている。

【0092】

屈折率プロファイルの場合、上記基準屈折率 $n_{cl,0}$ はクラッド領域の外側クラッドの屈折率である。

【0093】加えて、当該表中の非線形屈折率 N_2 は以下のように定義されている。すなわち、強い光の下における媒質の屈折率 $\langle N \rangle$ は、光パワーによって変わる。したがって、この屈折率 $\langle N \rangle$ に対する最低次の効果は、

$$\dots (23)$$

FDが $11.2\mu m$ であり、同等の実効コア断面積 A_{eff} を有する従来の光ファイバのMFDが $13\mu m$ 程度であったのに比較して、2割程度MFDを減少させることが可能である。

【0096】さらに、発明者らは、マイクロバンドによる損失の評価のため、表面にサンドペーパーを取り付けた直径 $280mm$ のリールにサンプル1の分散シフトファイバを巻き付けて、巻き付け前後での損失変動を測定した。その結果、波長 $1.55\mu m$ の光に対するサンプル1の損失増加が $0.19dB/km$ であったのに対して、従来の光ファイバは $1.12dB/km$ の損失増加が発生し、サンプル1の分散シフトファイバはマイクロバンドによる損失の増加を大幅に低減することが確認された。

【0097】次に、サンプル2の分散シフトファイバでは、波長 $1.55\mu m$ の光に対する光パワーの最大位置はコア中心から約 $3\mu m$ 離間している。波長 $1.55\mu m$ の光に対するこのサンプル2の実効コア断面積 A_{eff} は $86\mu m^2$ 、MFDは $11.0\mu m$ である。なお、サンプル1及び2のいずれも $2m$ のファイバ長でのカットオフ波長 λ_c は $1.7\mu m$ と使用波長($1.55\mu m$ 波長帯)より長波長であるが、ファイバ長 $100m$ 以上で

は波長 1.55 μm の光に対してシングルモードが保障されるため、通常の使用状態では実効的にシングルモードである。

【0098】このサンプル2の分散シフトファイバについても同様にマイクロバンドによる損失の増加を評価した結果、損失増加は 0.11 dB/km と極めて小さいことが確認された。また、波長 1.55 μm の光に対してこのサンプル2の波長分散値は -2.6 ps/mm/km であり、使用波長における分散値が零ではない（零分散波長 λ_0 が使用波長 1.55 μm よりも長波長側にシフトしている）。このため、波長多重伝送において信号の劣化に繋がる四光波混合の発生効率が低減される。

【0099】なお、上述のサンプル1及び2は、図18(a)に示されたように、内側コアの屈折率がクラッド領域の屈折率よりも低い1重リング構造の屈折率プロファイルを有していたが、この屈折率プロファイルに限定されることはない。すなわち、この発明に係る分散シフトファイバに適用可能な屈折率プロファイルとしては、例えば、図18(b)に示されたように内側コアの屈折率とクラッド領域の屈折率が一致した形状であってもよく、また、図18(c)に示されたようにディプレスト・リング構造や、図18(d)に示されたように2重リング構造であってもよい。

【0100】

【発明の効果】以上のように、この発明に係る分散シフトファイバによれば、波長 1550 nm における諸特性として、分散の絶対値を 1.0~4.5 ps/nm/km の範囲内に、実効コア断面積 A_{eff} を 70 μm^2 以上に、2mのファイバ長におけるカットオフ波長を 1300 nm 以上に、そして、分散スロープを 0.05~0.09 ps/nm²/km の範囲内に設定したので、非線形光学効果の発現を有効に抑制しつつ、高品質の長距離光伝送を実現することができるという効果がある。

【0101】この発明に係る分散シフトファイバは、リング状コア構造の屈折率プロファイル（ディプレストクラッド・リング状コア構造を備えた屈折率プロファイルを含む）を有するので、上述の諸特性を有する分散シフトファイバが好適に実現される。

【0102】さらに、この発明に係る分散シフトファイバによれば、信号光の基底モードの光パワー分布が最大となる位置が、コア領域中心から径方向に所定距離だけ離間しており、かつコア領域中心における信号光の基底モードの光パワーを P_0 とし、該基底モードの光パワー分布における最大値を P_1 としたとき、 $P_1 > 1.2 \times P_0$ なる関係を満たしているため、モードフィールド径 (MFD) を小さく維持した状態で実効コア断面積 A_{eff} を大きくすることが可能な構造が実現できるという効果がある。

【0103】また、具体的には、光パワーの最大値を取る位置がコア領域の中心から 0.5~5 μm 離間してお

り、実効コア断面積 A_{eff} の拡大が効果的に行うことができるという効果がある。そして、1.55 μm 波長帯の中心波長 (1550 nm) の光に対する諸特性として、所望の値が得られるよう屈折率プロファイルが設計されているため、非線形光学現象の発現を効果的に抑制することができるという効果もある。

【図面の簡単な説明】

【図1】この発明に係る分散シフトファイバの第1実施形態の断面構造及び径方向の屈折率プロファイルを示す図である。

【図2】リング状コア構造の屈折率プロファイルを有する分散シフトファイバにおいて、コア径（外側コアの外径）2bを変化させた場合の実効コア断面積 A_{eff} 及び MFD の変化を示すグラフである。

【図3】リング状コア構造の屈折率プロファイルを有する分散シフトファイバにおいて、コア径（外側コアの外径）2bを変化させたときの、2mのファイバ長におけるカットオフ波長 λ_c 及び分散スロープの変化を示すグラフである。

【図4】分散スロープの変化による、ビット誤り率 (BER) の変化を説明するためのグラフであり、(a) は分散スロープが 0.03 ps/nm²/km のときの BER の変化、(b) は分散スロープが 0.05 ps/nm²/km のときの BER の変化、(c) は分散スロープが 0.09 ps/nm²/km のときの BER の変化、そして、(d) は分散スロープが 0.12 ps/nm²/km のときの BER の変化を、それぞれ示している。

【図5】Q値を説明するための図である。

【図6】図1の分散シフトファイバにおける、信号光の基底モードの光パワー分布を説明するための図（断面構造及び径方向の屈折率プロファイルを含む）である。

【図7】第1実施形態の比較例に係る分散シフトファイバにおける、信号光の基底モードの光パワー分布を説明するための図（断面構造及び径方向の屈折率プロファイルを含む）である。

【図8】第1実施形態の変形例に係る分散シフトファイバの断面構造及び径方向の屈折率プロファイルを示す図である。

【図9】この発明に係る分散シフトファイバの第2実施形態の断面構造及び径方向の屈折率プロファイルを示す図である。

【図10】図9の分散シフトファイバにおける、信号光の基底モードの光パワー分布を説明するための図（断面構造及び径方向の屈折率プロファイルを含む）である。

【図11】第2実施形態の変形例に係る分散シフトファイバの断面構造及び径方向の屈折率プロファイルを示す図である。

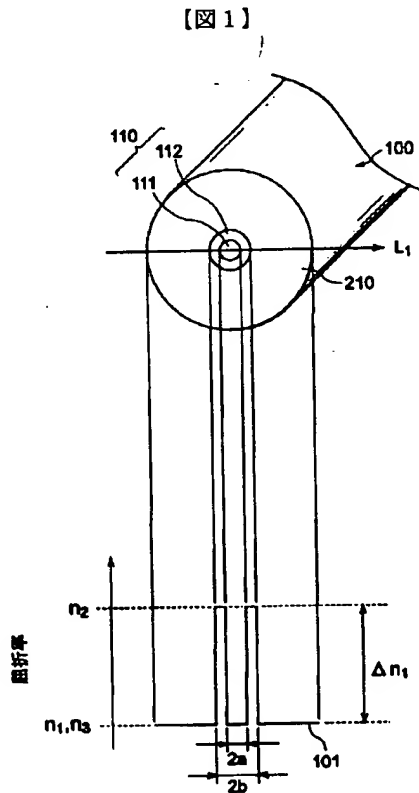
【図12】この発明に係る分散シフトファイバの諸特性を実現するための、構造パラメータの許容範囲を説明す

るための表、及び内側コアの外径と外側コアの外径との関係を示すグラフである。

【図 13】この発明に係る分散シフトファイバにおける、径方向に沿った電磁界分布（光パワー分布に相当）を示すグラフである。

【図 14】この発明に係る分散シフトファイバにおける、コア領域中心から電磁界電界値（光パワーに相当）が最大となる位置までの距離（ μm ）と、MFD（ μm ）との関係を示すグラフである。

【図 15】この発明に係る分散シフトファイバにおける、コア領域中心から電磁界電界値（光パワーに相当）が最大となる位置までの距離（ μm ）と、マイクロベン
ドによる損失増加（ dB/km ）との関係を示すグラフである。



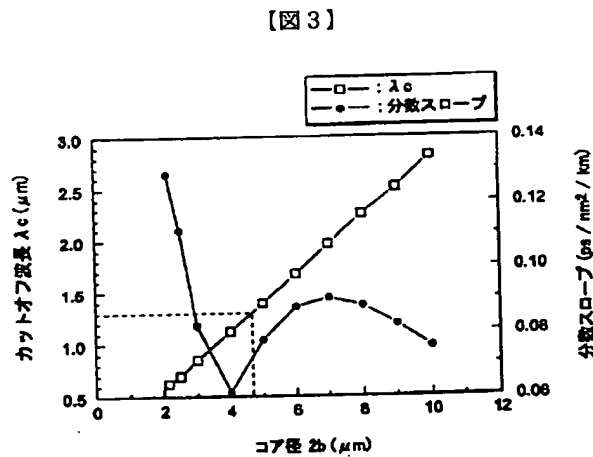
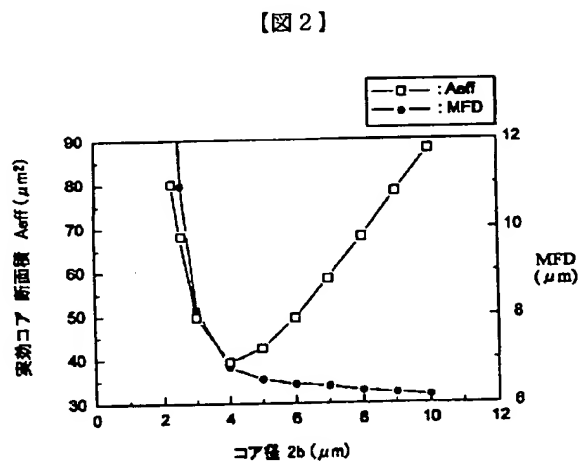
【図 16】この発明に係る分散シフトファイバにおける具体的な試作の諸特性を示す表である。

【図 17】この発明に係る分散シフトファイバにおける、屈折率プロファイルの一例とその光パワー分布を径方向に沿って示すグラフである。

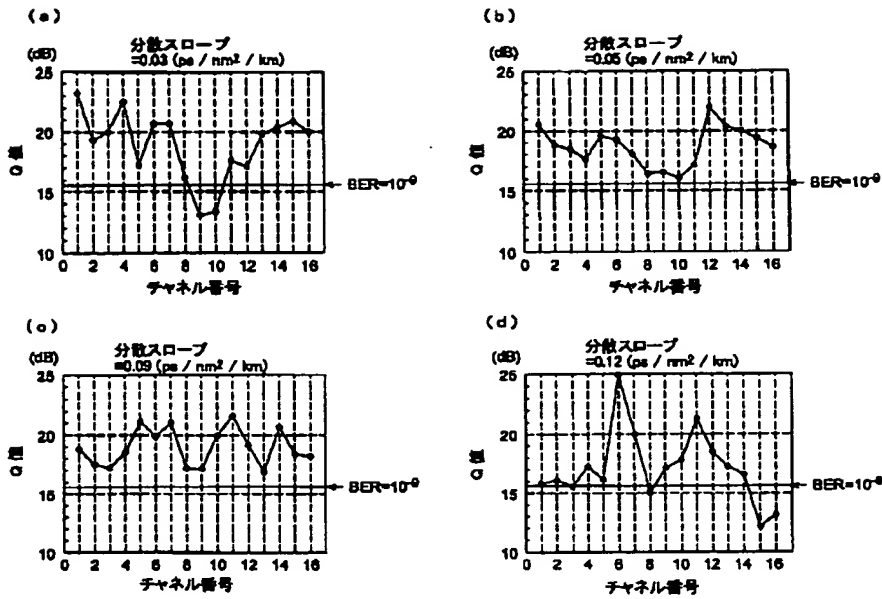
【図 18】この発明に係る分散シフトファイバに適用可能なコア構造の屈折率プロファイルの例を示す図である。

【符号の説明】

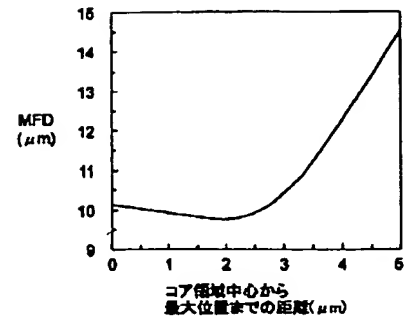
- 100、200…分散シフトファイバ、110、120…コア領域、111、121…内層コア、112、122…外層コア、210、220…クラッド領域、221…内層クラッド、222…外層クラッド。



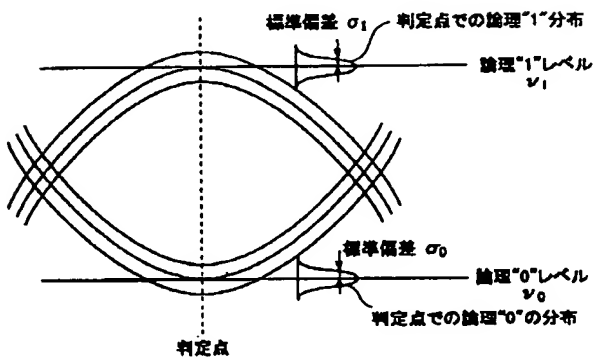
【図 4】



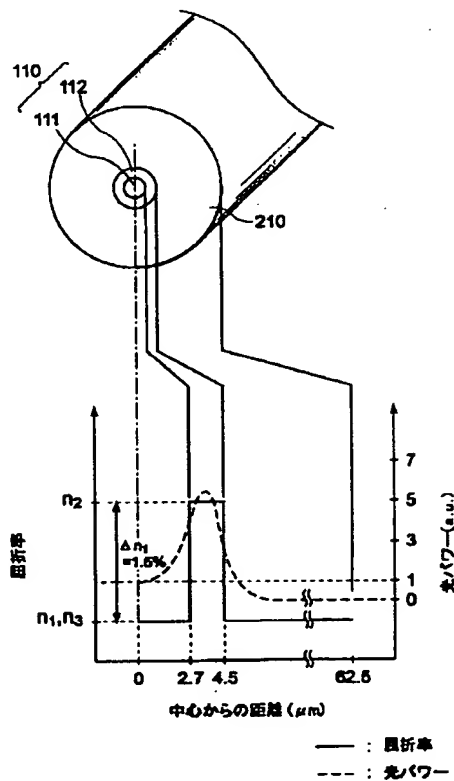
【図 14】



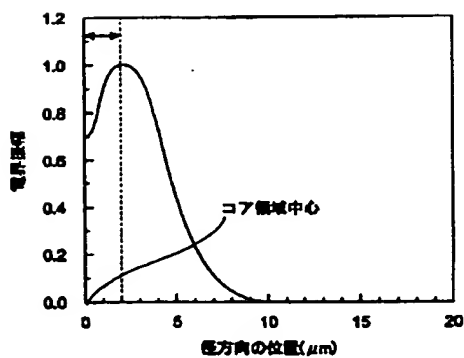
【図 5】



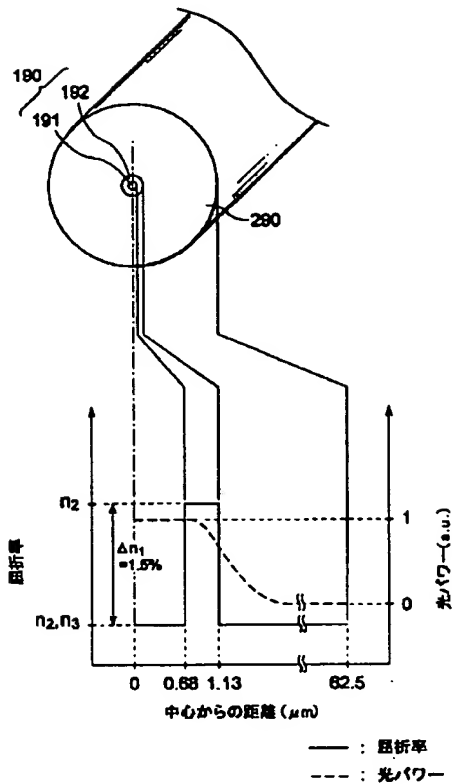
【図 6】



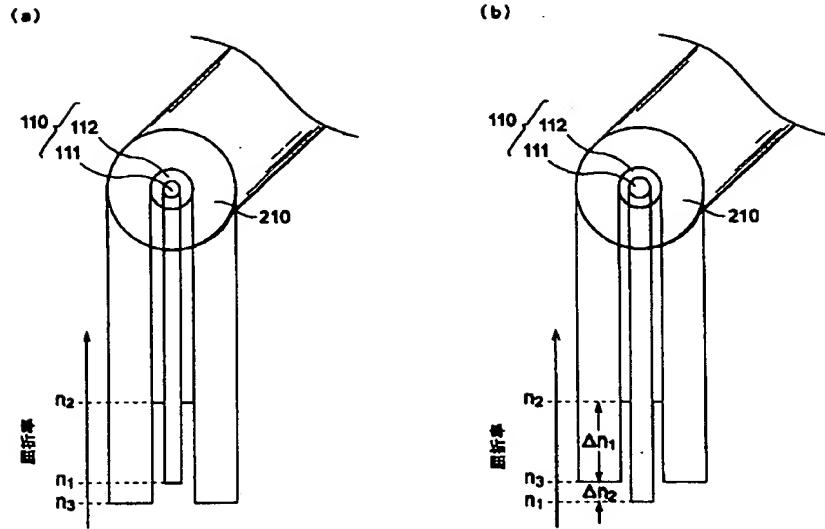
【図 13】



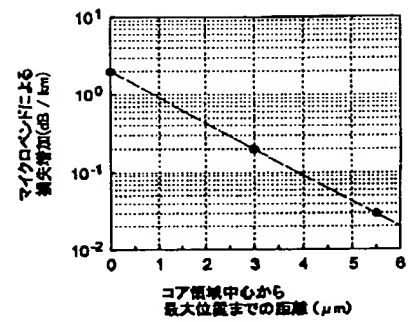
【図 7】



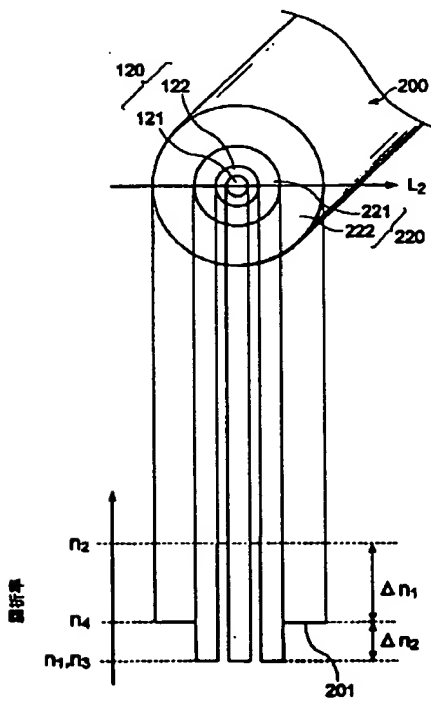
【図 8】



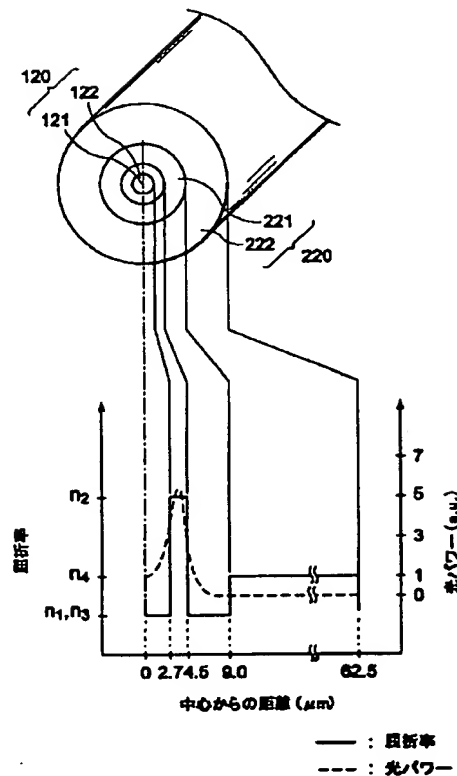
【図 15】



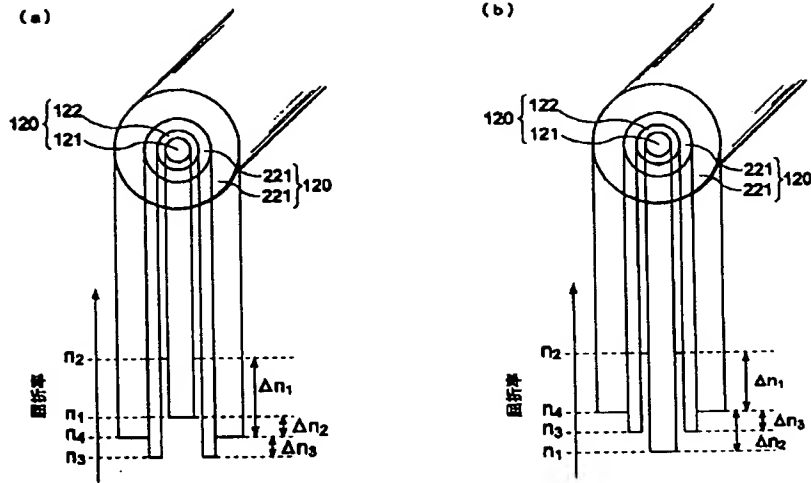
【図 9】



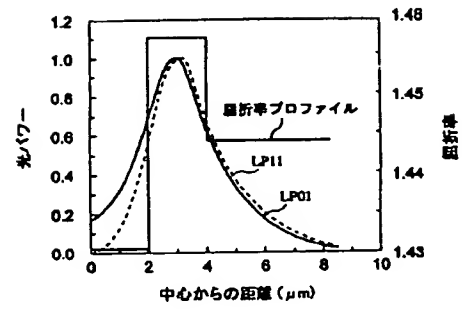
【図 10】



【図 11】



【図 17】



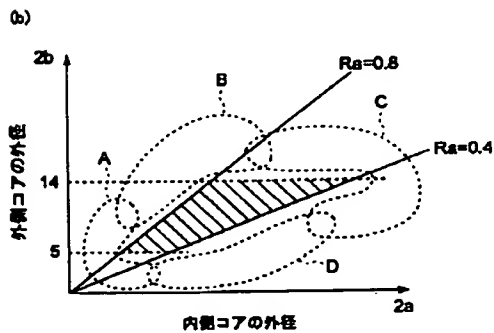
【図 12】

(a)

$\Delta n_2(\%)$	0.4	0	-0.4	-0.8
$\Delta n_1(\%)$	0.4-2.2	1.0-1.8	0.8-1.6	0.8-1.5
$Ra (=2a/2b)$	0.4-0.8	0.4-0.8	0.4-0.8	0.4-0.8
$2b(\mu m)$	5-14	5-14	5-14	5-14

【図 16】

	サンプル 1	サンプル 2
$\Delta n^-(\%)$	-1.00	-0.40
$\Delta n^+(\%)$	+0.95	+1.20
$Ra (= \frac{2a}{b})$	0.53	0.65
コア領域外径 $b(\mu m)$	7.4	7.5
零分散波長 $\lambda_0(\mu m)$	1.580	1.580
分散スロープ $(ps / nm^2 / km)$	0.079	0.088
実効コア断面積 $A_{eff}(\mu m^2)$	87	86
2m長でのカットオフ波長 (μm)	1.5	1.7
MFD (μm)	11.2	11.0
非線形屈折率 N_2	3.63	3.7
曲げ損失 (dB / km)	0.19	0.02



【図 18】

